

Caractérisation des dommages au choc de composites stratifiés aéronautiques : application à la chute d'objets

Characterization of impact damage of aeronautical composites laminates: application to falling objects

Ophélie Westphal¹, Nadia Bahlouli², Yves Rémond², Philippe Olivier³, Laurent Gornet¹, Fabrice Lawniczak², Wilfried Uhring⁴, Samuel Maillard⁵, Célia Chevallier⁵

1 : Laboratoire de Génie Civil et Mécanique
Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes
ophelie.westphal@ec-nantes.fr, laurent.gornet@ec-nantes.fr

2: Institut de Mécanique des Fluides et des Solides (IMFS)
2-4 rue Boussingault, 67 000 Strasbourg

nadia.bahlouli@unistra.fr, fabrice.lawniczak@imfs.u-strasbg.fr

3: IUT GMP, 133 C, Avenue de Rangueil, BP 67 701, F-31077 Toulouse
philippe.olivier@iut-tlse3.fr

4: Institut d'Electronique des Solides et des Systèmes (InESS)
23 Rue du Loess, 67037 Strasbourg Cedex 02
wilfried.uhring@unistra.fr

5: Pôle E.P.I, CETIM, 52 avenue Felix Louat, BP 80067, 60 304 SENLIS Cedex, France
samuel.maillard@cetim.fr, celia.chevallier@cetim.fr

Résumé

Cette étude porte sur la caractérisation des dommages de plaques stratifiées carbone/époxy suite à un impact basse vitesse. Les stratifiés étudiés sont constitués de nappes pré-imprégnées unidirectionnelles superposées de M21/T700GC. Les essais ont été réalisés en faisant varier masse de l'impacteur et hauteur de chute en conservant pour chaque essai, un niveau d'énergie identique recommandée par la norme aéronautique. L'instrumentation de l'essai ainsi que l'analyse multi physique réalisée sur les plaques impactées ont permis de mieux comprendre les mécanismes d'endommagements du matériau stratifié testé. En effet, ont été couplés accéléromètre, caméra rapide et jauges de déformations pour les mesures pendant l'essai. Une étude thermographique et une analyse aux ultrasons des plaques impactées ont révélés la localisation des endommagements dans les différents stratifiés testés. A niveau d'énergie initiale constante, les plaques testées avec la masse la plus importante sont très largement endommagées par rapport aux plaques impactées avec une faible masse.

Abstract

This study deals with the characterization of the damage induced by a low impact test on carbon/epoxy laminates (M21/T700GC). Four different sequences have been tested under two different experimental conditions. Even if these two conditions totally depend upon the impactor mass, they remain constant as far as the energy point of view is concerned. Different experimental techniques have been used to measure the indentation: strain gages and high speed video camera. To evaluate the damages in the laminates the impactor produces, an infrared camera and ultrasound analyses are carried out. These different techniques lead to a better understanding of the low impact effect.

Mots Clés : impact, stratifiés, caméra rapide, ultrasons multiéléments, thermographie infrarouge active

Keywords: impact, laminates, high speed video camera, infrared, ultrasound

• Introduction

L'utilisation des composites stratifiés dans le domaine de l'aéronautique et de l'aérospatiale s'est largement développé en raison de leur propriétés spécifiques comme la contrainte seuil ou le module spécifiques. Durant leur vie, les composites stratifiés sont amenés à subir des impacts basse vitesse dont l'origine est la chute d'outils lors de la phase d'assemblage ou de la maintenance des structures, ces chutes pouvant affecter les propriétés mécaniques résiduelles [1-2]. Le danger de ces chutes concerne principalement la détection des dommages occasionnés par la chute d'objet. En effet, une inspection visuelle se révèle insuffisante car les dommages peuvent être de type intra laminaire [3]. Dans l'étude proposée, une campagne expérimentale d'impacts basse vitesse a été

menée sur des plaques stratifiées constituées de nappes pré-imprégnées unidirectionnelles M21/T700GC. Ce matériau à usage aéronautique a été polymérisé en autoclave suivant le cycle de fabrication préconisé par le fabricant. Les caractéristiques mécaniques quasi-statiques du matériau dans son plan ont été déterminées à partir d'essais expérimentaux menés sur divers empilements. Les essais d'impact ont été réalisés sur la tour de chute développée à l'IMFS selon la norme aéronautique [4]. Diverses instrumentations ont été utilisées comme l'emploi d'une caméra rapide pour mieux appréhender la cinématique de l'essai et pour effectuer des calculs d'indentation, des jauges de déformations, un accéléromètre pour l'acquisition et une analyse post mortem des plaques impactées a été réalisée par ultrasons multiéléments et thermographie infrarouge active. La comparaison des différents résultats permettra d'améliorer les scénarios d'endommagements existants dans la littérature.

• Etude expérimentale

a. Matériaux

Le tissu carbone/époxy pré-imprégné unidirectionnel M21/35/268/T700GC retenu dans cette étude est classiquement utilisé dans la réalisation des structures primaires d'avion comme le caisson de voilure, l'empennage ou des morceaux de fuselage.

La fabrication des stratifiés s'est fait par le procédé de mise en œuvre sous vide de tissu pré-imprégné et la polymérisation sous autoclave [4]. Les éprouvettes rectangulaires de dimensions 250mm*10mm*2mm ont été équipées de patins en sergé verre pour la tenue des éprouvettes lors des tests de traction. Différents empilements ont été réalisés. Pour les essais de traction quasi-statique uniaxiale permettant l'identification des propriétés élastiques du pli unidirectionnel de M21/35/268/T700GC, des éprouvettes $[0]_s, [\pm 45]_s, [0, 90]_s$ selon la norme ISO 527-4 ont été découpées.

b. Essais de traction

Les essais de traction quasi-statique ont été réalisés sur une machine d'essai hydraulique Instron 8500 de l'IMFS. Les mesures de déformations ont été effectuées avec un extensomètre bidimensionnel INSTRON W-E402-G. Les valeurs identifiées ont été reportées dans le tableau 1. Expérimentalement, seules les propriétés dans le plan du stratifié sont accessibles. Ce matériau étant destiné à subir des sollicitations hors plan, les propriétés mécaniques élastiques tridimensionnelles du pli UD élémentaire sont reconstruites à l'aide de la théorie de l'homogénéisation des milieux périodiques. Les simulations sont menées à l'aide du code éléments finis Cast3M - CEA. Les modèles éléments finis du Volume Élémentaire Représentatif utilisés dans cette étude sont présentés sur la figure 1. Ce modèle éléments finis permet de faire varier l'espacement des fibres et ainsi de prendre en compte la variabilité des propriétés mécaniques du pli élémentaire tridimensionnel. Les caractéristiques mécaniques nominales sont résumées dans le tableau 1.

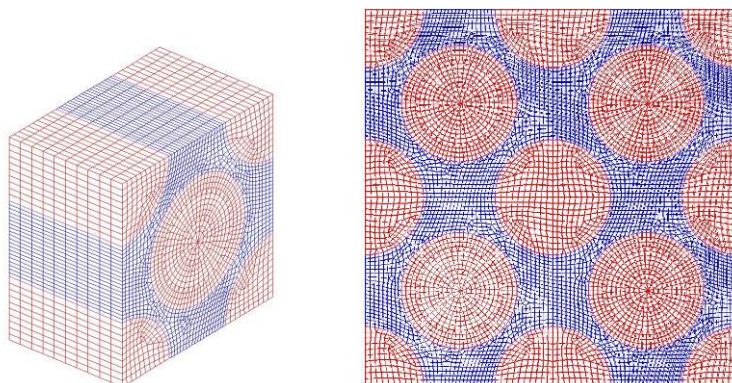


Fig. 1. Les VER tridimensionnels de l'UD dédiés à la variabilité des propriétés mécanique.

E1* (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	G12* (MPa)	G13 (MPa)	G23 (MPa)	v12*	v13	v23
116500	8300	8300	5200	5200	2800	0,39	0,39	0,40

Tab. 1. Caractéristiques de l'UD M21/35/268/T700GC, 268g/m² (valeurs issues des essais *)

Ces valeurs nous permettront dans la suite de l'étude consacrée à la modélisation de l'impact basse vitesse sur nos composites de travailler hors plan.

c. Essais d'impact

Les essais d'impact ont été réalisés sur des plaques stratifiées rectangulaires de dimensions nominales 100mm*150mm*4mm. Tous les essais ont été réalisés à une énergie constante de 26 joules. Cette énergie est la valeur préconisée dans la norme aéronautique. Quatre séquences d'empilements ont été testées pour deux masses différentes de l'impacteur (2,5 kg et 98 kg). Les différents impacts réalisés pour l'énergie de 26 J sont résumés dans le tableau 2. La mesure des dommages après impact a été effectuée par deux techniques différentes : une analyse par ultrasons multiéléments et une analyse par thermographie infrarouge active. Ces analyses ont été réalisées par le CETIM de Senlis.

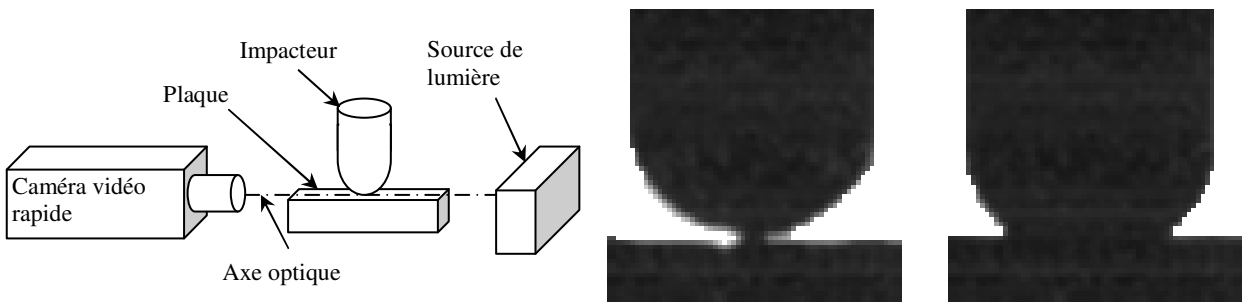
Expériences	Séquence d'empilement	Masse impacteur (kg)	Vitesse (m/s)
Energie 26 J			
1	[0/90] _{4s}	2,5	4,5
2	[0/90] _{4s}	98	0,73
3	[90/0] _{4s}	2,5	4,5
4	[-45/0/45/90] _{4s}	2,5	4,5
5	[-45/0/45/90] _{4s}	98	0,73
6	[(±45) ₈] _s	2,5	4,5
7	[(±45) ₈] _s	98	0,73

Tab. 2. Nomenclature et conditions expérimentales pour les différents empilements testés

Les essais de choc à basse vitesse ont été réalisés sur une tour de chute spécialement conçue à l'IMFS pour répondre à la norme aéronautique (ASTM D7136/D7136M). Le dispositif d'essais est constituée de deux structures totalement indépendantes : une structure métallique dite « mobile » apportant l'énergie cinétique nécessaire à l'essai de choc et une structure dite « fixe » comprenant un socle en béton supportant les systèmes de positionnement de la plaque d'essai ainsi que l'impacteur. Dans ce système, l'impacteur est déjà en contact avec l'éprouvette avant le déclenchement de l'essai. Il joue le rôle de pièce intermédiaire entre la masse tombante apportant l'énergie cinétique et l'éprouvette. L'impacteur est en acier allié Z160 ayant subi un traitement thermique (trempe et revenu) afin d'obtenir une dureté de 62 HRC en surface, qualité requise par la norme aéronautique. Il se compose de deux parties, la tête de l'impacteur dont l'extrémité est en contact avec l'éprouvette et le chapeau de l'impacteur permettant la transmission de l'énergie du percuteur à la tête de l'impacteur tout en protégeant le capteur présent à l'intérieur de celui-ci. L'impacteur est instrumenté avec un accéléromètre Kistler 8704B5000. L'acquisition des données est réalisée par le biais d'une carte d'acquisition National Instrument pilotée par un programme spécifique développé sur le logiciel Labview.

Les plaques ont été équipées de jauges montées en demi-pont sur la face opposée à l'impact afin de mesurer la flèche externe des plaques après l'impact. Les mesures des jauges ont été réalisées à l'aide d'un amplificateur-conditionneur Vishay Measurement 2200.

Une caméra ultrarapide CR600x2 [5] est utilisée pour enregistrer la cinématique de la plaque. Un champ de 19,3 par 19,3 mm est cadré sur une plage de 64×64 pixels. La résolution spatiale est donc d'environ 300 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. L'acquisition est effectuée à une cadence de 30000 images par seconde et une dynamique de 10 bits par pixel, soit à près de 1,3 Gbit/s. Les 8 Go de mémoire embarquée dans la caméra permettent d'acquérir une séquence de plus de 49 secondes. Ainsi le déclenchement de la caméra peut être effectué manuellement sans risque de perdre une partie de l'événement. L'axe optique de la caméra est placé dans le plan de la plaque. La caméra équipée d'un objectif Nikon 24-85 mm / 2,8D-4 est installée à une distance d'environ 80 cm de l'axe de l'impacteur afin minimiser les distorsions optiques. Une source de lumière uniforme est utilisée à l'arrière de la tour de chute afin d'acquérir la scène en ombre chinoise.



(a) Mise en œuvre de la caméra vidéo rapide (b) Image avant impact (c) image pendant impact
Fig. 2. Mise en œuvre de la caméra vidéo rapide en ombre chinoise (a) et exemple d'image obtenue avant l'impact (b) et pendant l'impact (c)

L'expertise des plaques impactées est réalisée à l'aide de la thermographie infrarouge active. C'est une technique de contrôle non destructif émergente qui consiste à chauffer de manière contrôlée la surface du matériau inspecté et à mesurer l'évolution de température résultante grâce à une caméra infrarouge (figure 3). Dans le cas où la pièce observée présente un défaut, la répartition de chaleur dans la pièce est modifiée et une analyse fine du thermogramme par des traitements d'images dédiés permet de mettre en évidence des discontinuités caractéristiques du défaut.

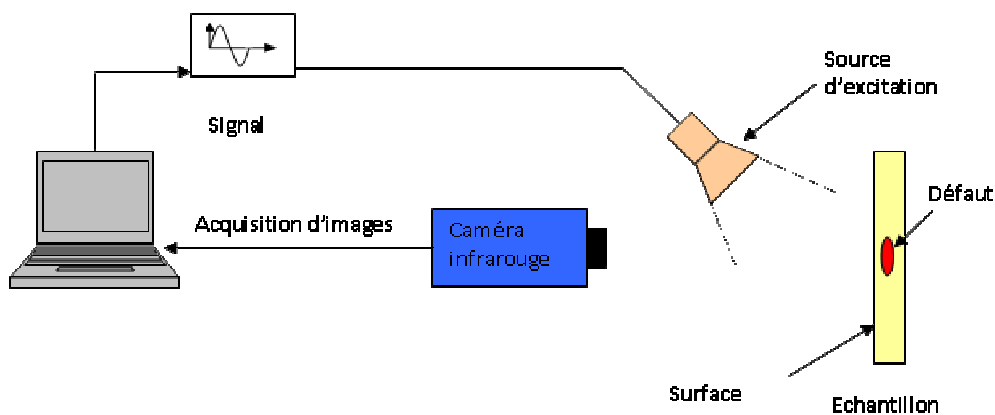
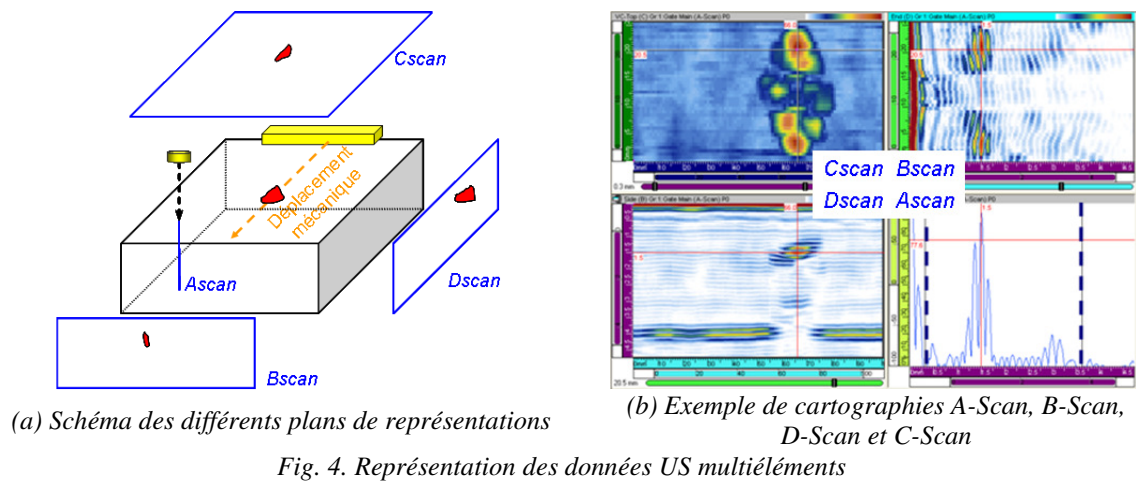


Fig. 3. Représentation du contrôle en thermographie infrarouge active.

Les défauts dans les zones impactées ont également été vérifiés à l'aide d'un contrôle ultrasons. Ce contrôle par ultrasons consiste à propager des ondes acoustiques dans la pièce à contrôler et à mettre en évidence les discontinuités dans le matériau composite stratifié. Depuis quelques années, les moyens de contrôle conventionnels ont évolué et le contrôle peut être effectué à l'aide de traducteurs multiéléments. Les données obtenues sont alors visualisées au moyen de cartographies C-Scan qui correspondent à une vue de dessus de la pièce contrôlée (cf. figure 4). La vue C-Scan représente, en échelle de couleurs, l'amplitude (ou le temps de vol) des données d'acquisition (ou signaux A-Scan) obtenues au cours de la séquence de tirs dans une porte de mesure définie.



3. Résultats expérimentaux

L'instrumentation du dispositif d'essai a permis de recueillir l'accélération au point d'impact en fonction du temps. La déformation totale de la face arrière de la plaque au droit du point d'impact a également été enregistrée en fonction du temps. Le logiciel d'analyse d'images (ImageJ) a permis de traiter les images acquises par la caméra rapide et de déterminer le déplacement de l'impacteur en fonction du temps ainsi que l'indentation maximale au point d'impact. Les jauges ont permis d'enregistrer la déflexion de la plaque dans le cas où l'impact est réalisé par un impacteur de faible masse. Les résultats des plaques $[(\pm 45)_8]_s$ sont présentés sur les figures 5, 6.

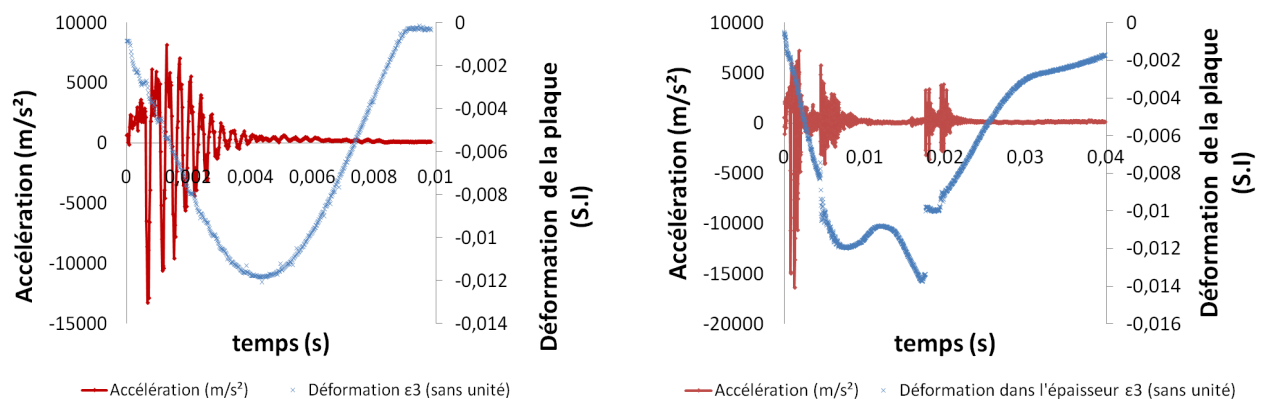


Fig. 5. Evolution en fonction du temps de l'accélération brute de l'impacteur et de la déformation au dos de la plaque pour les éprouvettes a) $[(\pm 45)_8]_s$ testée pour une masse de 2,5 kg à 4,5m/s et b) $[(\pm 45)_8]_s$ testée pour une masse de 98kg à 0,73m/s

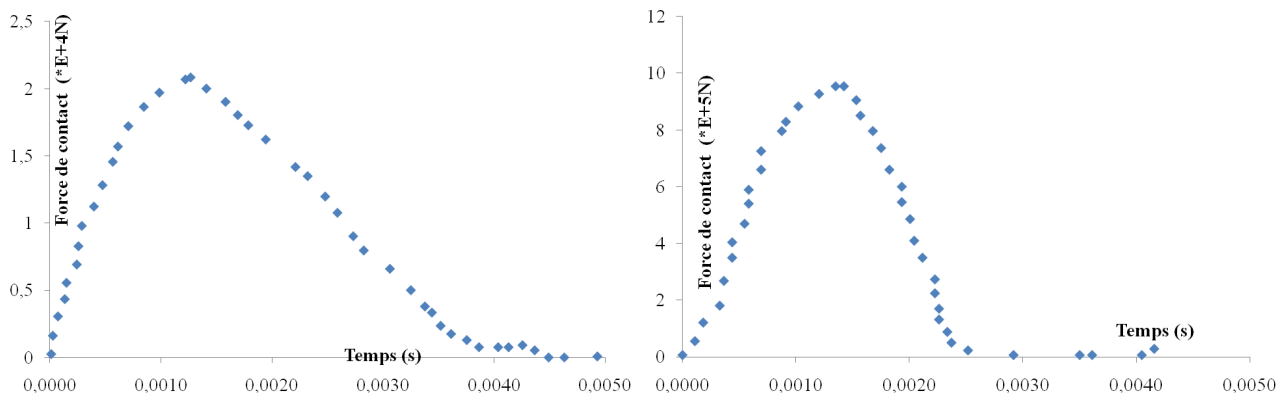


Fig. 6. Evolution en fonction du temps de l'effort de l'impacteur sur la plaque pour les éprouvettes a) $[(\pm 45)_8]_s$ testée pour une masse de 2,5 kg à 4,5 m/s et b) éprouvettes $[(\pm 45)_8]_s$ testée pour une masse de 98 kg à 0,73 m/s

Grâce aux images acquises par caméra rapide, il a été constaté de multiples contacts entre la plaque et l'impacteur qui sont à l'origine des oscillations. Afin d'illustrer nos propos, et dans le souci de ne pas alourdir le présent document, seule une plaque représentative de l'essai commenté sera présentée. L'inspection visuelle d'une plaque correspondant à un empilement $[0/90]_{4s}$ testée pour une masse de 98 kg à 0,73 m/s est présentée sur la figure 7a.

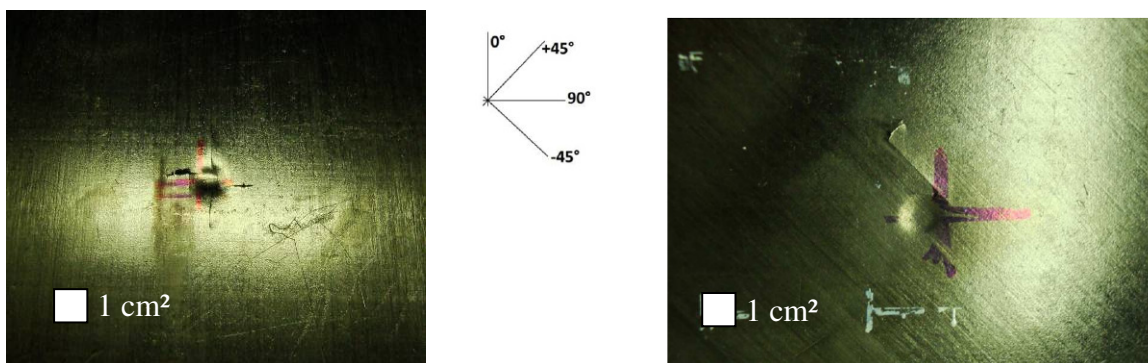


Fig. 7. Photographies de la surface impactée de deux plaques d'empilement a) $[0/90]_{4s}$ b) $[-45/0/45/90]_{4s}$ testées dans les mêmes conditions de choc : pour une masse de 98 kg à 0,73 m/s

La mesure de l'indentation permanente des plaques est présentée sur la figure 8. La profondeur d'indentation représente la différence entre le point le plus bas de l'indentation et la surface plane de la plaque.

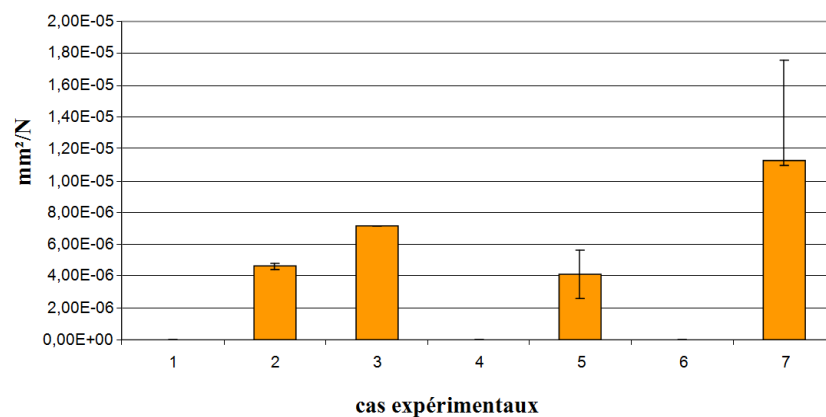


Fig. 8. Résultats expérimentaux des indentations permanentes mesurées juste après l'impact sur les éprouvettes présentées dans la tab. 2 et la figure 8

Les éprouvettes testées aux conditions expérimentales 4,5 m/s et 2,5 kg ne présentent pas d'indentation permanente.

Le stratifié $[(\pm 45)_8]_s$ présente une indentation permanente après impact plus importante que les autres stratifiés. L'indentation est notamment deux fois plus importante que celle des stratifiés $[0/90]_{4s}$. De plus, les stratifiés $[90/0]_{4s}$ présentent une indentation plus importante que les stratifiés $[0/90]_{4s}$. Les stratifiés quasi-isotropes présentent le moins d'indentation.

Après analyse des essais, il a été observé qu'en dépit d'une énergie de chute égale, les tests effectués avec un impacteur de 2,5 kg mènent à des forces de contact de l'ordre de 50 fois plus petites que dans le cas des tests pour lesquels l'impacteur pèse 98 kg, quels que soient les empilements. En outre, aucune indentation permanente n'apparaît sur les empilements testés sous faible poids, tandis que les plaques testées avec un impacteur lourd présentent, outre une dépression permanente au point d'impact, des faciès d'endommagement attribués à de la fissuration de matrice et des délaminages. Les déformations en flexion subies par ces dernières plaques sont également plus importantes.

Pour l'ensemble des stratifiés testés, impactés au niveau de leur surface supérieure, la surface délaminée a une forme oblongue dont l'axe principal est, au niveau de l'interface, dans la direction des fibres du pli le plus bas. Bien que de nombreuses expériences estiment que l'importance du délaminage, quantifiée au regard de l'étendue de la zone délaminée, est d'autant plus grande que le nombre d'interfaces sujettes aux délaminages est élevée [6], les résultats obtenus expérimentalement dans cette étude montrent une moins bonne résistance de l'empilement « quasi-isotrope » cumulant pourtant le moins grand nombre d'interfaces critiques.

Finalement, il apparaît qu'à énergie d'impact constante, il existe effort seuil en dessous de laquelle il n'apparaît pas de délaminages. L'endommagement commence à se développer après que la force d'impact ait dépassée cette valeur critique, naturellement dépendante de l'énergie cinétique initiale du projectile.

4. Discussions

Pour des impacts ne conduisant pas à la pénétration de l'impacteur dans la plaque, le principal endommagement est le délaminage. Ce mode de dégradation réduit considérablement la raideur de la plaque stratifiée.

Le Contrôle Non Destructif par ultrasons multiéléments et la thermographie infrarouge active ont permis d'évaluer l'influence de la nature des empilements ($[90/0]_{4s}$, $[(\pm 45)_8]_s$, $[-45/0/45/90]_4$) sur l'aire de la zone endommagée.

La comparaison des résultats obtenus (cf. figure 9) dans les deux conditions expérimentales montre que la masse de l'impacteur a une influence importante sur l'endommagement à énergie constante et ceci quel que soit le type d'empilement. Les images obtenues par ultrasons (US) (colonne de gauche) et par thermographie (colonne de droite) représentent la carte des dégradations du matériau impacté en vue de dessus.

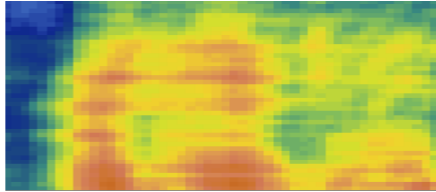
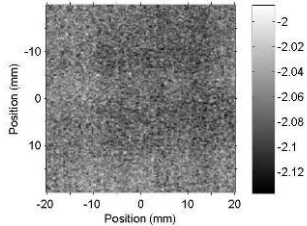
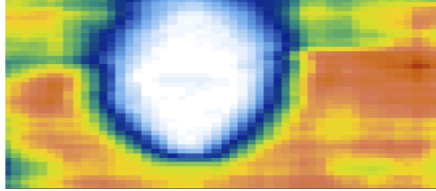
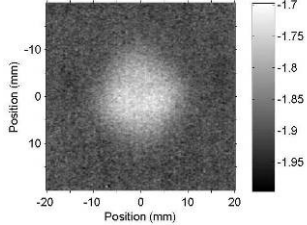
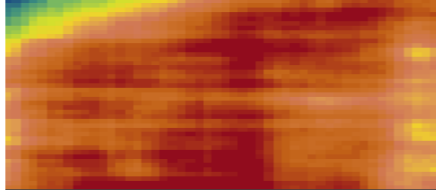
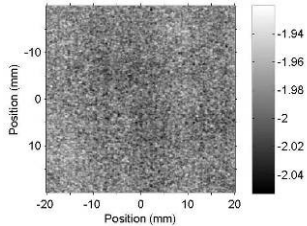
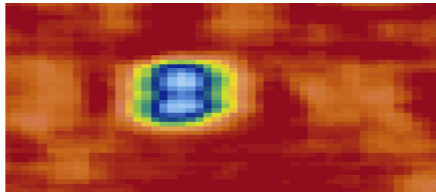
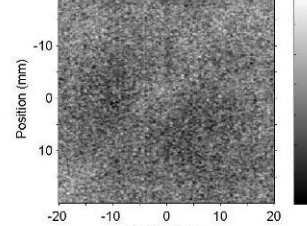
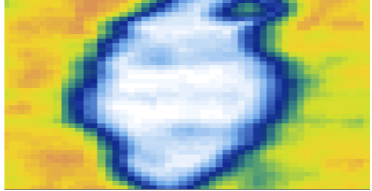
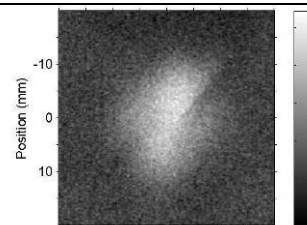

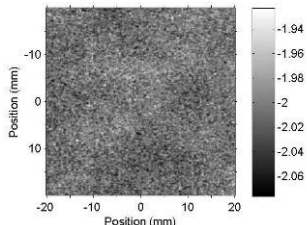
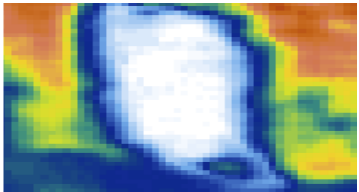
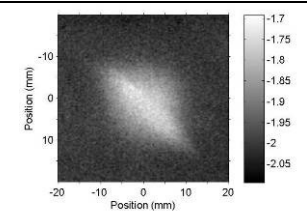
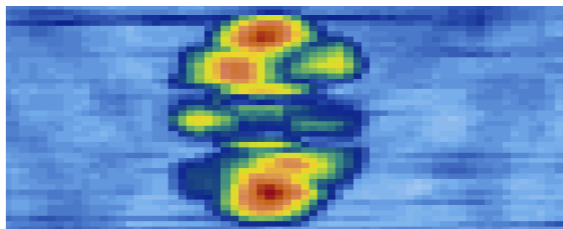
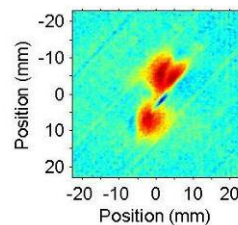
<i>Eprouvette</i>	<i>Résultats en US multiéléments</i>	<i>Résultats en thermographie active</i>	<i>Taille du défaut éventuel</i>
1 [(0/90)4]s 2.5 kg 4.5 m/s			
2 [(0/90)4]s 98 kg 0.73 m/s			$\phi_2 \sim 20\text{mm}$
3 [(90/0)4]s 2.5 kg 4.5 m/s			
4 [(-45/0/45/90)4]s 2.5 kg 4.5 m/s			$\phi_4 \sim 5\text{mm}$
5 [(-45/0/45/90)4]s 98 kg 0.73 m/s			$\phi_5 \sim 23\text{mm}$
6 [(±45)4]s 2.5 kg 4.5 m/s			
7 [(±45)4]s 98 kg 0.73 m/s			$\phi_7 \sim 20\text{mm}$

Fig. 9. Résultats des Contrôles non Destructifs

Une analyse fine des résultats obtenus permet également de déterminer la forme du défaut dans l'épaisseur, c'est-à-dire de déterminer l'orientation du délaminage le long de l'empilement. Sur la figure 10, nous proposons deux images obtenues lors des contrôles menés par ultrasons multiéléments et par thermographie infrarouge active. Ces images mettent en évidence différents lobes qui apparaissent au fur à mesure de l'inspection dans l'épaisseur de la plaque stratifiée. Ces lobes correspondent en fait à la géométrie du délaminage dans l'épaisseur de la pièce. On s'aperçoit également que leur direction correspond à la direction des plis adjacents à la côte considérée.



(a) Cartographie ultrasonore avec une porte sur la zone 0,3 à 1,8mm



(b) Thermogramme de phase

Fig. 10. Exemples d'analyse du délaminage dans l'épaisseur de l'éprouvette n°5

5. Conclusions

L'étude expérimentale de traction combinée à une méthode d'homogénéisation a permis de déterminer l'ensemble des caractéristiques mécaniques élastiques tridimensionnelles du carbone époxy. Des essais de chute de masses ont ensuite été menés à l'aide d'une machine d'impact. Dans le cas d'une énergie d'impact constante de 26 joules, et quelque soient les empilements testés, l'effort sur la plaque issu de la masse de 2.5Kg sont environ 50 fois plus faible que pour la masse de 98 Kg. De plus, aucune indentation permanente n'apparaît sur les empilements testés sous faible poids, tandis que les plaques testées avec un impacteur lourd présentent, outre une empreinte permanente au point d'impact, des faciès d'endommagement attribués à la fissuration de la matrice et à des délaminages. Par conséquent, même si l'énergie d'impact reste la même, de fortes différences d'endommagement existent entre les deux cas expérimentaux. Les analyses par ultrasons et thermographie active réalisées sur les plaques impactées ont montrées que la forme de la surface endommagée est directement liée à la direction des fibres dans l'épaisseur de l'empilement.

Références

- [1] S. ABRATE. "Impact on composite structures ". *New-York : Cambridge University Press*, 1998.
- [2] O. ALLIX, D. GUEDRA-DEGEORGES, S. GUINARD, A. VINET, « Analyse de la tenue à l'impact basse vitesse et basse énergie de stratifiés composites par la mécanique de l'endommagement », *Mécanique et Industries*, vol 1, p 27-35, 2000.
- [3] ZY. Zhang, MOW Richardson, "Low velocity impact induced damage evaluation and its effect on the residual flexural properties of pultruded CRP composite", *Composites Structure*, vol.81, p 195-201, 2007.
- [4] K. TARSHA-KURDI, P.OLIVIER, « Thermoviscoelastic analysis of residual curing stresses and the influence of autoclave pressure on the stresses in carbone/epoxy laminates". *Composites Science and Technology*, vol.62, issue 4. 2002.
- [5] Optronis GmbH, Honsellstr.8, 77694 Kehl, Germany, www.optronis.com
- [6] ASTM D7136/D7136M, « Standard Method for measuring the damage resistance of a fibre-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event ».
- [7] D.LIU. "Impact-Induced Delamination—A View of Bending Stiffness Mismatching". *Metallurgy, Mechanics, and Materials Science Department Michigan State University East Lansing, MI 48824*. 1988.